



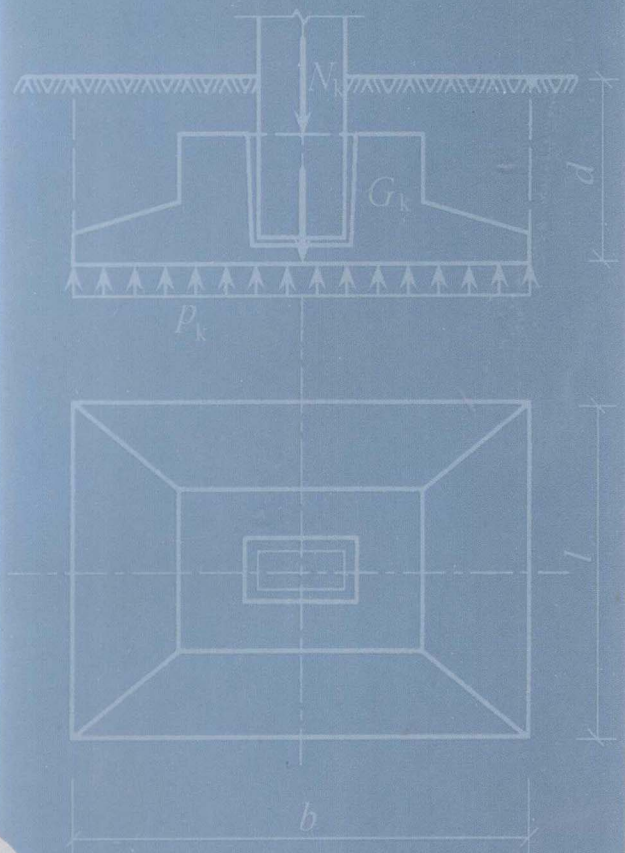
高等学校土木工程本科指导性专业规范配套系列教材

总主编 何若全

# 混凝土结构设计

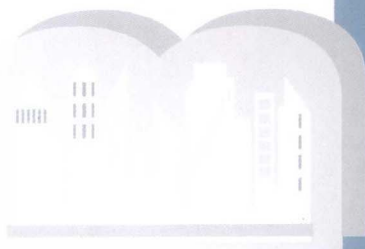
HUNNINGTU  
JIEGOU SHEJI

主 编 梁兴文  
副主编 李 艳  
          李 波  
          邓明科  
主 审 童岳生



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>





高等学校土木工程本科指导性专业规范配套系列教材

总主编 何若全

# 混凝土结构设计

HUNNINGTU  
JIEGOU SHEJI

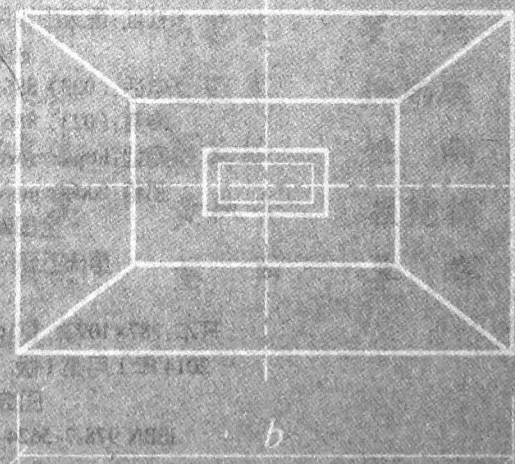
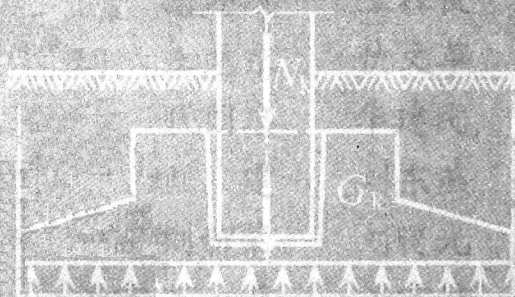
主 编 梁兴文

副主编 李 艳

李 波

邓明科

主 审 童岳生



重庆大学出版社



## 内 容 提 要

本书为高等院校土木工程专业的专业课教材,内容包括概论、混凝土梁板结构、单层工业厂房混凝土结构、混凝土框架结构设计等,是根据最新颁布的国家标准和规范而编写的。

本书着重阐明各种混凝土结构整体设计的基本概念和方法,对结构方案设计、结构分析方法和确定结构计算简图等内容有比较充分的论述,有利于培养读者的创新能力;对各主要结构给出了比较完整的设计实例,有利于初学者掌握基本概念和设计方法;每章附有小结、思考题和习题等。本书文字通俗易懂,论述由浅入深,循序渐进,便于自学理解。

本书可作为高等院校土木工程专业的教材,也可供相关专业的设计、施工和科研人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构设计/梁兴文主编.—重庆:重庆大学出版社,2013.12  
高等学校土木工程本科指导性专业规范配套系列教材  
ISBN 978-7-5624-7769-3

I.①混… II.①梁… III.①混凝土结构—结构设计—高等学校—教材 IV.①TU370.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 235923 号

## 混凝土结构设计

主 编 梁兴文  
副主编 李 艳 李 波 邓明科  
主 审 童岳生  
责任编辑:林青山 版式设计:莫 西  
责任校对:邬小梅 责任印制:赵 晟

\*

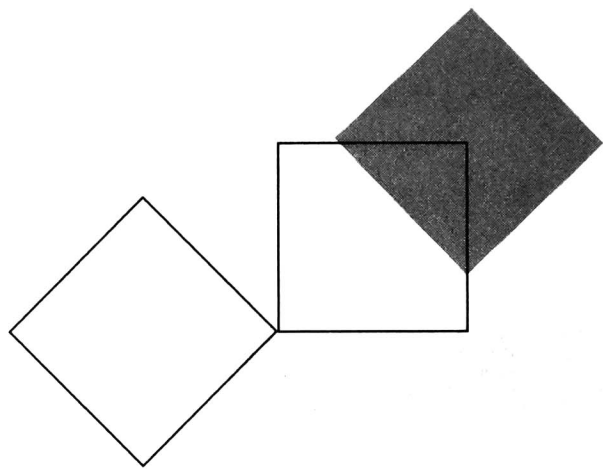
重庆大学出版社出版发行  
出版人:邓晓益  
社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号  
邮编:401331  
电话:(023) 88617190 88617185(中小学)  
传真:(023) 88617186 88617166  
网址:<http://www.cqup.com.cn>  
邮箱:[fxk@cqup.com.cn](mailto:fxk@cqup.com.cn) (营销中心)  
全国新华书店经销  
重庆五环印务有限公司印刷

\*

开本:787×1092 1/16 印张:21.5 字数:537 千  
2014 年 1 月第 1 版 2014 年 1 月第 1 次印刷  
印数:1—3 000  
ISBN 978-7-5624-7769-3 定价:36.00 元

---

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换  
版权所有,请勿擅自翻印和用本书  
制作各类出版物及配套用书,违者必究



# 编委会名单

总主编：何若全

副总主编：杜彦良 邹超英 桂国庆 张永兴

编委（按姓氏笔画为序）：

卜建清	王广俊	王连俊	王社良
王建廷	王雪松	王慧东	仇文革
文国治	龙天渝	代国忠	华建民
向中富	刘凡	刘建	刘东燕
刘尧军	刘俊卿	刘新荣	刘曙光
许金良	孙俊	苏小卒	李宇峙
李建林	汪仁和	宋宗宇	张川
张忠苗	范存新	易思蓉	罗强
周志祥	郑廷银	孟丽军	柳炳康
段树金	施惠生	姜玉松	姚刚
袁建新	高亮	黄林青	崔艳梅
梁波	梁兴文	董军	覃辉
樊江	魏庆朝		

# 总序

进入 21 世纪的第二个十年,土木工程专业教育的背景发生了很大的变化。“国家中长期教育改革和发展规划纲要”正式启动,中国工程院和国家教育部倡导的“卓越工程师教育培养计划”开始实施,这些都为高等工程教育的改革指明了方向。截至 2010 年底,我国已有 300 多所大学开设土木工程专业,在校生达 30 多万人,这无疑是世界上该专业在校大学生最多的国家。如何培养面向产业、面向世界、面向未来的合格工程师,是土木工程界一直在思考的问题。

由住房和城乡建设部土建学科教学指导委员会下达的重点课题“高等学校土木工程本科指导性专业规范”的研制,是落实国家工程教育改革战略的一次尝试。“专业规范”为土木工程本科教育提供了一个重要的指导性文件。

由“高等学校土木工程本科指导性专业规范”研制项目负责人何若全教授担任总主编,重庆大学出版社出版的《高等学校土木工程本科指导性专业规范配套系列教材》力求体现“专业规范”的原则和主要精神,按照土木工程专业本科期间有关知识、能力、素质的要求设计了各教材的内容,同时对大学生增强工程意识、提高实践能力和培养创新精神做了许多有意义的尝试。这套教材的主要特色体现在以下方面:

(1) 系列教材的内容覆盖了“专业规范”要求的所有核心知识点,并且教材之间尽量避免了知识的重复;

(2) 系列教材更加贴近工程实际,满足培养应用型人才对知识和动手能力的要求,符合工程教育改革的方向;

(3) 教材主编们大多具有较为丰富的工程实践能力,他们力图通过教材这个重要手段实现“基于问题、基于项目、基于案例”的研究型学习方式。

据悉,本系列教材编委会的部分成员参加了“专业规范”的研究工作,而大部分成员曾为“专业规范”的研制提供了丰富的背景资料。我相信,这套教材的出版将为“专业规范”的推广实施,为土木工程教育事业的健康发展起到积极的作用!

中国工程院院士 哈尔滨工业大学教授

沈世钊

# 前 言

本书是根据新颁布的房屋建筑工程国家标准以及《土木工程专业规范》的规定而编写的。书中介绍了房屋建筑工程中混凝土结构的设计方法,包括概论、混凝土梁板结构、单层工业厂房混凝土结构、混凝土框架结构等,内容侧重于混凝土结构的整体设计,与《混凝土结构基本原理》(重庆大学出版社,2011年10月)一书配套使用。本书是高等学校土木工程专业本科生的主干课程教材,亦可作为本专业大專生的教学用书,并可供从事实际工作的建筑结构设计人员参考使用。

混凝土结构整体设计主要包括下列内容:选择结构方案和结构体系,进行结构布置;建立结构计算简图,选用合适的结构分析方法;计算作用(荷载)、作用(荷载)效应,并进行作用(荷载)效应组合;构件截面设计及构件间的连接构造等。其中结构方案设计是关键,其合理与否对结构的可靠性和经济性影响很大。为此,书中用较多的篇幅介绍了结构方案设计的主要内容。建立结构计算简图和选用结构分析方法是结构设计的一个重要内容,本书除在各章对不同结构分别论述其计算简图和分析方法外,还在第1章集中论述了这个问题,以引起读者对此问题的重视。鉴于读者已在《结构力学》课程中学习了结构分析的一般方法,所以本书仅介绍结构分析的简化分析方法。结构简化分析方法除可用于手算外,其解决问题的思路对培养学生分析问题和解决问题的能力以及创新能力均有帮助,因此本书对各种简化分析方法作了较详细的论述。第3、4章均有结构抗震设计内容,编写时将其中的共同部分放在第1章,教师授课时可将第1章有关的抗震内容与第3章一起讲述。

本书着重与理论与实践相结合,力求对基本概念论述清楚,使读者通过对有关内容的学习,熟练地掌握结构分析方法;书中有明确的计算方法和实用设计步骤,力求做到能具体应用;特别是对各主要结构附有完整的工程设计实例,有利于初学者对基本概念的理解和设计方法的掌握。为了便于学习,每章有小结、思考题和习题等内容,这对教学要求、自学理解、巩固深入、熟练掌握都是有益的,能提高教学效果。

本书由西安建筑科技大学梁兴文(第1章、3.8~3.10节、4.8节)和邓明科(第4章)、河南理工大学李艳(第2章)以及长安大学李波(第3章)编写。由资深教授童岳生先生主审,他提出了许多宝贵意见。研究生车佳玲、党争、尧智平、王英俊和徐洁,为本书绘制了插图。特在此对他们表示深切的感谢。

本书在编写过程中参考了大量国内外文献,引用了一些学者的资料,这在本书末的参考文

献中已予列出。

希望本书能为读者的学习和工作提供帮助。鉴于作者水平有限,书中难免有错误及不妥之处,敬请读者批评指正。

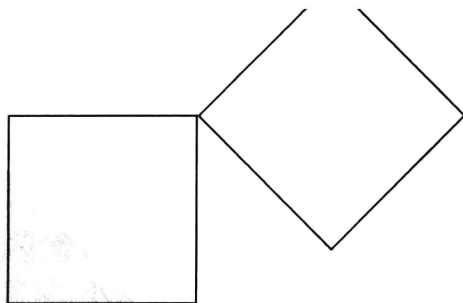
编 者  
2013 年 10 月

# 目 录

1	混凝土结构设计概论	1
1.1	一般说明	1
1.2	混凝土结构设计内容	2
1.3	混凝土结构分析	4
1.4	作用及作用效应	8
1.5	结构设计要求	16
1.6	地基承载力验算	19
	本章小结	20
	思考题	20
2	混凝土梁板结构	21
2.1	概述	21
2.2	单向板肋梁楼盖设计	26
2.3	双向板肋梁楼盖设计	56
2.4	柱支承双向板楼盖	72
2.5	装配式混凝土楼盖	81
2.6	楼梯	85
2.7	悬挑结构	94
	本章小结	96
	思考题	96
	习题	97
3	单层厂房结构	99
3.1	结构类型和结构体系	99
3.2	结构组成及荷载传递	100
3.3	结构布置	104



3.4	构件选型与截面尺寸确定 .....	113
3.5	排架结构内力分析 .....	120
3.6	柱的设计 .....	139
3.7	柱下独立基础设计 .....	146
3.8	装配式单层钢筋混凝土柱厂房的抗震概念设计 .....	154
3.9	装配式单层钢筋混凝土柱厂房的横向抗震计算 .....	156
3.10	装配式单层钢筋混凝土柱厂房的纵向抗震计算 .....	162
3.11	单层厂房排架结构设计实例 .....	168
	本章小结 .....	207
	思考题 .....	208
	习题 .....	209
<b>4</b>	<b>混凝土框架结构</b> .....	<b>211</b>
4.1	多、高层建筑混凝土结构概述 .....	211
4.2	框架结构的结构方案设计 .....	215
4.3	框架结构的计算简图及荷载计算 .....	220
4.4	竖向荷载作用下框架结构内力的近似计算 .....	224
4.5	水平荷载作用下框架结构内力和侧移的近似计算 .....	227
4.6	荷载组合的效应设计值及构件设计 .....	241
4.7	框架结构的构造要求 .....	244
4.8	框架结构的抗震设计 .....	247
4.9	框架结构的基础 .....	260
4.10	设计实例 .....	267
	本章小结 .....	303
	思考题 .....	304
	习题 .....	304
	<b>附录</b> .....	<b>307</b>
	附表 1 等截面等跨连续梁在常用荷载作用下的内力系数表 .....	307
	附表 2 双向板计算系数表 .....	314
	附表 3 风荷载特征值 .....	319
	附表 4 5~50/5t 一般用途电动桥式起重机基本参数和尺寸系列 (ZQ1—62) .....	323
	附表 5 钢筋混凝土结构伸缩缝最大间距(m) .....	324
	附表 6 I 形截面柱的力学特性 .....	325
	附表 7 框架柱反弯点高度比 .....	326
	<b>参考文献</b> .....	<b>336</b>



# 混凝土结构设计概论

## 本章导读：

- **基本要求** 了解混凝土结构设计的基本内容以及结构分析的基本原则和分析模型；掌握结构方案设计的内容和原则、5种结构分析方法的基本概念和适用范围、风荷载和地震作用计算方法以及结构设计要求。

- **重点** 结构方案设计的内容和原则；5种结构分析方法的基本概念和适用范围；风荷载和地震作用计算方法。

- **难点** 混凝土结构分析模型；地震作用计算方法。

## 1.1 一般说明

混凝土结构是以混凝土为主要材料制成的结构,包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、混合结构及配置各种纤维的混凝土结构等。

素混凝土一般用于基础、重力式挡土墙、支墩、地坪等主要承受压力的结构。钢筋混凝土可用于承受压力、拉力、弯矩、剪力和扭矩等各种受力形式的构件或结构。由于预应力混凝土具有抗裂性好、刚度大和强度高特点,故一般用于制作跨度大、荷载重以及有抗裂、抗渗等要求的构件或结构。

钢-混凝土组合结构是由型钢和混凝土或钢筋混凝土相组合而共同工作的一种结构形式,兼有钢结构和钢筋混凝土结构的一些优点。钢管混凝土结构、型钢混凝土组合结构、钢-混凝土组合梁等是典型和应用广泛的组合结构形式。

混合结构是由钢框架(框筒)或型钢混凝土框架(框筒)或钢管混凝土框架(框筒)与混凝土核心筒组成的结构,是目前高层特别是超高层建筑结构的主要结构形式,如上海中心(高 632 m)和深圳平安金融中心(高 648 m)等均为混合结构。

纤维混凝土结构是指在普通混凝土中掺入适当的各种纤维材料而形成纤维增强混凝土,其

抗拉、抗剪、抗折强度和抗裂、抗冲击、抗疲劳、抗震和抗爆等性能均有较大提高,因而在抗爆、抗冲击、抗震等结构中得到较大发展和应用。

单层混凝土建筑结构主要用于单层工业厂房、仓库、影剧院、体育馆等单层空旷房屋,这种结构一般由屋盖和钢筋混凝土柱组成,根据房屋的功能不同和跨度大小,屋盖可采用钢筋混凝土梁板结构、拱或薄壳、折板以及钢筋混凝土屋架或钢屋架等。

多层建筑混凝土结构是指2~9层或房屋高度不大于28 m的住宅和房屋高度不大于24 m的其他民用建筑结构。除上述单层、多层混凝土建筑结构外,其余为高层建筑混凝土结构。多、高层建筑的竖向承重混凝土结构可采用框架、板柱、剪力墙、框架-剪力墙、板柱-剪力墙和筒体等结构体系。

在多、高层建筑结构中,楼盖或屋盖基本上都是钢筋混凝土结构。混凝土结构的基础均采用钢筋混凝土基础。

## 1.2 混凝土结构设计内容

混凝土结构设计的基本内容包括结构方案设计、结构内力和变形分析、作用效应组合、构件及其连接构造设计以及绘制施工图等。

### 1.2.1 结构方案设计

结构方案设计是整幢建筑设计是否合理的关键,应满足结构受力合理、技术先进以及尽可能达到综合经济技术指标较优的原则要求;在与建筑方案协调时应考虑结构体型(高宽比、长宽比)适当,传力途径和构件布置能够保证结构的整体稳固性,避免因局部破坏引发结构连续倒塌。

结构方案设计主要包括结构体系选择、结构布置和主要构件截面尺寸估算等内容。

#### (1) 结构体系选择

根据建筑的用途及功能、建筑高度、荷载情况、抗震要求和所具备的物质与施工技术条件等因素选用合理的结构体系。在初步设计阶段,一般须提出两种以上不同的结构方案,然后进行方案比较,综合考虑,选择较优的方案。

#### (2) 结构布置

在结构体系选择的基础上,选用构件形式和布置,确定各结构构件之间的相互关系和传力路径,主要包括定位轴线、构件布置和结构缝的设置等。结构的平、立面布置宜规则,各部分的质量和刚度宜均匀、连续;结构的传力途径应简捷、明确,竖向构件宜连贯、对齐;宜采用超静定结构,重要构件和关键传力部位应增加冗余约束或有多条传力途径。结构设计时应通过设置结构缝将结构分割为若干相对独立的单元,应根据结构受力特点及建筑尺度、形状、使用功能等要求,合理确定结构缝的位置和构造形式;宜控制结构缝的数量,应采取有效措施减少设缝对建筑功能、结构传力、构造做法和施工可行性等造成的影响,遵循“一缝多能”的设计原则,采取有效的构造措施。

#### (3) 构件截面尺寸的估算

梁、板等水平构件的截面尺寸一般根据刚度和构造等条件,凭经验确定;柱、墙等竖向构件

的截面尺寸一般根据侧移(或侧移刚度)和轴压比的限值来估算。

## 1.2.2 结构内力与变形分析

结构分析是指根据已确定的结构方案和结构布置以及构件截面尺寸和材料性能等,确定合理的计算简图和分析方法,进行作用(荷载)计算,通过计算分析准确地求出结构内力和变形,以便根据计算结果进行构件设计。

计算结构上的作用(荷载)是进行结构分析的前提。作用(荷载)计算就是根据建筑结构的实际受力情况计算各种作用(荷载)的大小、方向、作用类型、作用时间等,作为结构分析的主要依据之一。

确定结构计算模型,包括确定结构力学模型、计算简图和采用的计算方法。计算简图是进行结构分析时用以代表实际结构的经过简化的模型,是结构受力分析的基础,计算简图的选择应分清主次,抓住本质和主流,略去不重要的细节,使得所选取的计算简图既能反映结构的实际工作性能,又便于计算。计算简图确定后,应采取适当的构造措施使实际结构尽量符合计算简图的特点。计算简图的选取受较多因素的影响,一般来说,结构越重要,选取的计算简图应越精确;施工图设计阶段的计算简图应比初步设计阶段精确;静力计算可选择较复杂的计算简图,动力和稳定计算可选用较简略的计算简图。

## 1.2.3 作用效应组合

作用(荷载)效应组合是指按照结构可靠度理论把各种作用(荷载)效应按一定规律加以组合,以求得在各种可能同时出现的作用(荷载)作用下结构构件控制截面的最不利内力。通常,对结构在各种单项荷载作用下分别进行分析,得到结构构件控制截面的内力和变形后,根据在使用过程中结构上各种荷载同时出现的可能性,按承载能力极限状态和正常使用极限状态分项系数与组合值系数加以组合,并选取各自的最不利组合值作为结构构件和基础设计的依据。

## 1.2.4 结构构件及其连接构造的设计

根据结构荷载效应组合结果,选取对配筋起控制作用的截面不利组合内力设计值,按承载能力极限状态和正常使用极限状态分别进行截面的配筋计算和裂缝宽度、变形验算,计算结果尚应满足相应的构造要求。构件之间的连接构造设计就是保证连接节点处被连接构件之间的传力性能符合设计要求,保证不同材料结构构件之间的良好结合,选择可靠的连接方式以及保证可靠传力所采取可靠的措施等。

## 1.2.5 结构施工图绘制

结构施工图是全部设计工作的最后成果,是进行施工的主要依据,是设计意图最准确、最完整的体现,是保证工程质量的重要环节。结构施工图绘制应遵守一般的制图规定和要求。

## 1.3 混凝土结构分析

混凝土结构是由钢筋和混凝土两种性能差别很大的材料组成的结构。一般钢筋的拉、压屈服强度相等；而混凝土的拉、压强度相差悬殊，在应力较小时其应力-应变关系即出现非线性变化，且出现裂缝后为各向异性体。因此，钢筋混凝土结构在荷载作用下的受力性能十分复杂，是一个不断变化的非线性过程。对混凝土结构，合理地确定其力学模型和选择分析方法是提高计算精度、确保结构安全可靠的重要环节。为此，我国《混凝土结构设计规范》对混凝土结构分析的基本原则和各种分析方法的应用条件作出了明确规定，其内容反映了我国混凝土结构的设计现状、工程经验和试验研究等方面所取得的进展。

### 1.3.1 结构分析的基本原则

为了保证混凝土结构内力和变形计算结果的可靠性，对混凝土结构进行分析时，应遵守下列基本原则：

①混凝土结构按承载能力极限状态计算和按正常使用极限状态验算时，应进行整体作用（荷载）效应分析，必要时还应对结构中的重要部位、形状突变部位以及内力和变形有异常变化的部位（例如较大孔洞周围、节点及其附近、支座和集中荷载附近等）受力状况，进行更详细的分析，以便更准确地掌握其受力状况。

②混凝土结构在施工和使用期的不同阶段（如结构的施工期、检修期和使用期，预制构件的制作、运输和安装阶段等）有多种受力状况时，应分别进行结构分析，并确定其最不利的作用效应组合。当结构可能遭遇火灾、飓风、爆炸、撞击等偶然作用时，应按国家现行有关标准的要求进行相应的结构分析。

③结构分析时，所采用的计算简图、几何尺寸、计算参数、边界条件、结构材料性能指标、构造措施等应符合实际工作状况。结构上可能的作用（荷载）及其组合、初始应力和变形状况等也应符合结构的实际工作状况。所采用的各种近似假定和简化，应有理论、试验依据或经工程实践验证；计算结果的精度应符合工程设计的要求。计算结果应有相应的构造措施加以保证，如固定端和刚节点的承受弯矩能力和对变形的限制、塑性铰充分转动的能力、适筋截面的配筋率或受压区相对高度的限值等。

④结构分析方法的建立都是基于三类基本方程，即力学平衡方程、变形协调（几何）条件和本构（物理）关系。其中，结构整体或其中任何一部分的力学平衡条件都必须满足；结构的变形协调条件，包括节点和边界的约束条件等，若难以严格地满足，则应在不同的程度上予以满足；材料或构件单元的受力-变形关系，应合理地选取，尽可能符合或接近钢筋混凝土的实际性能。

⑤混凝土结构分析时，应根据结构类型、材料性能和受力特点等选择合理的分析方法。目前，按力学原理和受力阶段不同，混凝土结构常用的计算方法主要有弹性分析方法、塑性内力重分布分析方法、弹塑性分析方法、塑性极限分析方法以及试验分析方法。

上述分析方法中，又各有多种具体的计算方法，如解析法或数值解法、精确解法或近似解法。结构设计时，应根据结构的重要性和使用要求、结构体系的特点、作用（荷载）状况、要求的计算精度等加以选择；计算方法的选取还取决于已有的分析手段，如计算程序、手册、图表等。

⑥目前,结构设计一般采用计算机软件进行结构分析和构件截面设计。为了确保计算结果的正确性,结构分析所采用的计算机软件应经考核和验证,其技术条件应符合现行国家规范和有关标准的要求;计算分析结果应经判断和校核,在确认其合理、有效后,方可用于工程设计。

### 1.3.2 结构分析模型

混凝土结构宜按空间体系进行结构整体分析,并宜考虑结构构件的弯曲、轴向、剪切和扭转变形对结构内力的影响。当需要进行简化分析时,应结合工程实际情况和采用的力学模型,对承重结构进行适当简化,使其既能较正确反映结构的真实受力状态,又能够适应所选用分析软件的力学模型与运算能力,从根本上保证分析结果的可靠性。例如,对于体型规则的空间结构,可沿柱列或墙轴线分解为不同方向的平面结构,考虑平面结构的空间协同工作进行计算;当构件的轴向、剪切和扭转变形对结构内力分析影响不大时,可不予考虑。

结构计算简图应根据结构的实际形状、构件的受力和变形状况、构件间的连接和支承条件以及各种构造措施等,进行合理的简化后确定。梁、柱、杆等一维构件的轴线取为截面几何中心的连线,墙、板等二维构件的中轴面取为截面中心线组成的平面或曲面。现浇结构和装配整体式结构的梁柱节点、柱与基础连接处等,当有相应的构造和配筋作保证时,可作为刚接;非整体浇筑的次梁两端及板跨两端可近似作为铰接;有地下室的建筑底层柱,其固定端的位置取决于底板(梁)的刚度;节点连接构造的整体性程度决定连接处是按刚接还是按铰接考虑。梁、柱等杆件的计算跨度或计算高度可按其两端支承长度的中心距或净距确定,并根据支承节点的连接刚度或支承反力的位置加以修正。当钢筋混凝土梁柱构件截面尺寸相对较大时,梁柱等杆件间连接部分的刚度远大于杆件中间截面的刚度,梁柱交汇点会形成相对的刚性节点区域,在计算模型中可按刚域处理,刚域尺寸的合理确定,会在一定程度上影响结构整体分析的精度。

结构整体分析时,为减少结构分析的自由度,提高分析效率,对于现浇钢筋混凝土楼盖或有现浇面层的装配整体式楼盖,可近似假定楼板在其自身平面内为无限刚性。当楼盖开有较大洞口或其局部会产生明显的平面内变形时,结构分析应考虑楼盖面内变形的影响,根据楼盖的具体情况,楼盖面内弹性变形可按全部楼盖、部分楼盖或部分区域考虑。对于现浇钢筋混凝土楼盖和有现浇面层的装配整体式楼盖,可近似采用增加梁翼缘计算宽度的方式来考虑楼板作为翼缘对梁刚度和承载力的贡献。对带地下室的结构,应适当考虑回填土对结构水平位移的约束作用,当地下室结构的楼层侧向刚度不小于相邻上部结构楼层侧向刚度的2倍时,可将地下室顶板作为上部结构水平位移的嵌固部位。当地基与结构的相互作用对结构的内力和变形有显著影响时,结构分析中应考虑地基与结构相互作用的影响。

### 1.3.3 混凝土结构分析方法

#### 1) 弹性分析方法

弹性分析方法假定结构材料为理想的弹性体,是最基本和最成熟的结构分析方法,也是其他分析方法的基础和特例,可用于混凝土结构的承载能力极限状态及正常使用极限状态作用效应的设计计算。

混凝土结构弹性分析可采用结构力学或弹性力学等分析方法。杆系结构(指由长度大于3

倍截面高度的构件所组成的连续梁、框架等结构)通常采用结构力学方法进行内力和变形计算。非杆系的二维或三维结构,通常假定结构为完全匀质材料,即不考虑钢筋的存在和混凝土开裂及塑性变形的影响,利用最简单的材料各向同性本构关系,即只需要弹性模量和泊松比两个物理常数,采用弹性力学方法进行作用效应计算。对体型规则的结构,可根据作用的种类和特性,采用适当的简化分析方法。结构内力的弹性分析和构件截面承载力的极限状态设计相结合,实用上简易可行,按此设计的结构,其承载力一般偏于安全。

结构构件的刚度计算时,混凝土的弹性模量按《混凝土结构设计规范》的规定采用,截面惯性矩按匀质的混凝土全截面计算,一般不计钢筋的换算面积,也不扣除预应力钢筋孔道等的面积。对端部加腋的构件,应考虑其截面变化对结构分析的影响。对不同受力状态下的构件,考虑混凝土开裂、徐变等因素的影响,其截面刚度可予以折减。

结构中二阶效应是指作用在结构上的重力或构件的轴压力在变形后的结构或构件中引起的附加内力和附加变形,包括侧移二阶效应( $P-\Delta$ 效应)和受压构件的挠曲二阶效应( $P-\delta$ 效应)两部分。当结构的二阶效应可能使作用效应显著增大时,在结构分析时应考虑二阶效应的不利影响。重力侧移二阶效应计算属于结构整体层面的问题,可考虑混凝土构件开裂对构件刚度的影响,采用结构力学等方法进行分析,也可采用《混凝土结构设计规范》给出的简化分析方法。受压构件的挠曲二阶效应计算属于构件层面的问题,一般在构件设计时考虑。

对钢筋混凝土双向板,当边界支承位移对其内力和变形有较大影响时,在分析中需要考虑边界支承竖向变形及扭转等的影响。

## 2) 塑性内力重分布分析方法

超静定混凝土结构在出现塑性铰的情况下,使结构中的内力分布规律(弯矩图等)不同于按弹性分析方法计算所得的结果,在结构中引起内力重分布。可利用这一特点进行构件截面之间的内力调整,充分发挥混凝土结构的潜力,以达到简化设计、节约配筋和方便施工的目的。

塑性内力重分布分析方法主要有极限平衡法、塑性铰法、变刚度法、弯矩调幅法以及弹塑性分析方法等。其中,弯矩调幅法是指在弹性弯矩的基础上,根据需要适当调整某些截面(通常是弯矩绝对值最大的截面)的弯矩,其他截面的弯矩根据平衡条件确定,按调整后的内力进行截面设计。该方法计算简单,为多数国家的设计规范所采用。

钢筋混凝土连续梁、连续单向板和双向板等,可采用塑性内力重分布方法进行分析。重力荷载作用下的框架、框架-剪力墙结构中的现浇梁等,经弹性分析求得内力后,可对支座或节点弯矩进行适度调整,并确定相应的跨中弯矩。对于协调扭转问题,由于相交构件的弯曲转动受到支承梁的约束,在支承梁内引起扭转,其扭矩会由于支承梁的开裂产生内力重分布而减小,支承梁的扭矩宜考虑内力重分布的影响。

按考虑塑性内力重分布分析方法设计的结构和构件,由于塑性铰的出现,构件的变形和抗弯能力较小部位的裂缝宽度均较大,应进行构件变形和裂缝宽度验算,以满足正常使用极限状态的要求或采取有效的构造措施。同时,由于裂缝宽度较大等原因,对于直接承受动力荷载的结构,以及要求不出现裂缝或处于严重侵蚀环境等情况下的结构,不应采用考虑塑性内力重分布的分析方法。

## 3) 弹塑性分析方法

弹塑性分析方法是指考虑混凝土结构的受力特点,通过建立结构构件的平衡条件、变形协

调条件和弹塑性本构关系,借助于计算分析软件,可较准确计算或详尽地分析结构从开始受力直至破坏全过程的内力、变形和裂缝发展等,适用于任意形式和受力复杂结构的分析。

弹塑性分析方法主要用于重要或受力复杂结构的整体或部分分析,可根据结构类型和复杂性、要求的计算精度等选择相应的计算模型。结构弹塑性分析时,应预先设定结构的形状、尺寸、边界条件、材料性能和配筋等,应根据实际情况采用不同的离散尺度,确定相应的本构关系,如材料的应力-应变关系、构件截面的弯矩-曲率关系、构件或结构的内力-变形关系等。钢筋和混凝土的材料特征值及本构关系宜根据试验分析确定,也可采用规范规定的材料强度平均值、本构模型或多轴强度准则;必要时还应考虑结构几何非线性的不利影响;当分析结果用于承载力设计时,宜考虑抗力模型不定性系数对结构的抗力进行适当调整。对某些变形较大的构件或节点区域等,钢筋与混凝土界面的粘结滑移对其分析结果有较大的影响,在对其进行局部精细分析时,宜考虑钢筋与混凝土间的粘结-滑移本构关系。

混凝土结构的弹塑性分析,可根据实际情况采用静力或动力弹塑性分析方法。结构构件的计算模型以及离散尺度应根据实际情况以及计算精度的要求确定。梁、柱、杆等杆系构件,其一个方向的正应力明显大于另外两个正交方向的应力,则可简化为一维单元,且宜采用纤维束模型或塑性铰模型,采用杆系有限元方法求解。墙、板等构件,其两个方向的正应力均显著大于另一个方向的应力,则可简化为二维单元,且宜采用膜单元、板单元或壳元,采用平面问题有限元方法求解。复杂的混凝土结构、大体积混凝土结构、结构的节点或局部区域等,其3个方向的正应力无显著差异,当对其需作精细分析时,应按三维块体单元考虑,采用空间问题有限元方法求解。结构的弹塑性分析均须编制电算程序,利用计算机来完成大量繁琐的数值运算和求解。

#### 4) 塑性极限分析方法

对于超静定结构,结构中的某一个截面(或某几个截面)达到屈服,整个结构可能并没有达到其最大承载能力,外荷载还可以继续增加,先达到屈服截面的塑性变形会随之不断增大,并且不断有其他截面陆续达到屈服,直至有足够数量的截面达到屈服,使结构体系即将形成几何可变机构,结构才达到最大承载能力。结构的塑性极限分析又称为塑性分析或极限分析,是指结构在承载能力极限状态下,找出其内力分布规律和满足塑性变形的规律,得到其满足塑性变形规律和结构机动条件的破坏机构,进而求出结构的极限荷载。因此,利用超静定结构的这一受力特征,采用塑性极限分析方法来计算结构的最大承载力,并以达到最大承载力时的状态,作为整个结构的承载能力极限状态,由于不考虑弹塑性发展过程而使计算分析大为简化,既可以使超静定结构的内力分析更接近实际内力状态,也可以充分发挥超静定结构的承载潜力,使结构设计更经济合理。

由于整个结构达到承载能力极限状态时,结构中较早达到屈服的截面已处于塑性变形阶段,即已形成塑性铰,这些截面实际上已具有一定程度的损伤,这种损伤对于一次加载情况的最大承载力影响不大。因此,对于不承受多次重复荷载作用的混凝土结构,当有足够的塑性变形能力时,可采用塑性极限分析方法进行结构的承载力计算,但仍应满足正常使用极限状态的要求。

结构极限分析一般应同时满足内力的平衡条件、形成足够数目塑性铰的机构条件和截面弯矩等于或小于塑性弯矩的屈服条件。当上述3个条件同时满足时,可得到其精确解。通常,结构能满足平衡条件,其他两个条件可能不能同时满足,根据满足的条件不同,可得到不同的近似解。当结构满足平衡条件和机构条件时,一般是选取一种可能的破坏机构,根据虚功方程或平



衡方程求解结构的极限荷载;由于可能的破坏机构有多种,理论上应分别计算,并选取其中最小者作为极限荷载,这种解法称为上限解。当结构满足平衡条件和屈服条件时,一般是选取一种可能的内力分布,使其既满足平衡条件和力的边界条件,同时又满足屈服条件,根据内外力的平衡可求解结构的极限荷载;由于结构可能的内力分布有多种,理论上应分别计算,并选其中最大者作为极限荷载,这种解法称为下限解。

对可预测结构破坏机制的情况,结构的极限承载力可根据预定的结构塑性屈服机制,采用塑性极限分析的上限解法(如机动法、极限平衡法等)进行分析。对难于预测结构破坏机制的情况,结构的极限承载力可采用静力或动力弹塑性分析方法确定。对直接承受偶然作用的结构构件或部位,应根据偶然作用的动力特征考虑其动力效应的影响。对承受均布荷载的周边支承的双向矩形板,可采用塑性铰线法(上限解法)或条带法(下限解法)等塑性极限分析方法进行设计(详见 2.3 节)。实践经验证明,按此类方法进行计算和构造设计,简便易行,可保证安全。

### 5) 试验分析方法

当结构或其部位的体型不规则和受力状况复杂,如不规则开洞的剪力墙、框架和桁架的主要节点、受力状态复杂的水坝、不规则的空间壳体等,或采用了新型的材料及构造,又无恰当的简化分析方法或对现有结构分析方法的计算结果没有充分把握时,可采用试验分析方法对结构的正常使用极限状态和承载能力极限状态进行分析或复核。

## 1.3.4 间接作用下混凝土结构分析

对大体积混凝土结构、超长混凝土结构等,混凝土的收缩、徐变以及温度变化等间接作用在结构中产生的作用效应,特别是裂缝问题比较突出,可能危及结构的安全性或正常使用时,宜进行间接作用效应的分析,并采取相应的构造措施和施工措施。对于允许出现裂缝的钢筋混凝土结构构件,应考虑裂缝的开展使构件刚度降低的影响,以减少作用效应计算的失真。

一般可采用弹塑性分析方法对混凝土结构进行间接作用效应分析。如有充分的理论依据,也可考虑混凝土开裂和徐变对构件刚度的影响,按弹性方法进行近似分析。

## 1.4 作用及作用效应

### 1.4.1 一般说明

结构上的作用分为永久作用、可变作用和偶然作用。建筑结构中的屋面、楼面、墙体、梁柱等构件自重以及找平层、保温层、防水层等质量都是永久作用(荷载)。永久荷载标准值可按结构构件的设计尺寸和材料单位体积的自重计算确定。可变作用包括楼、屋面活荷载、雪荷载、风荷载等,其标准值均可按《建筑结构荷载规范》(以下简称《荷载规范》)确定。偶然作用包括强烈地震、爆炸、撞击等引起的作用,其值可按相应的国家标准确定。

本节简要说明风荷载和地震作用的计算方法。